

УДК 621.315.392

© 1992

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА GaAs

О. К. Городниченко, В. Ф. Коваленко, А. В. Прохорович

При изучении методом фотолюминесценции влияния высокотемпературной ( $T = 800\text{—}1100\text{ }^\circ\text{C}$ ) пластической деформации на свойства сильно легированных кристаллов  $n\text{-GaAs(Sn)}$  впервые обнаружен при повышении температуры деформации эффект деформационно-стимулированного распада сложных комплексов. Указанное обусловлено уменьшением концентрации комплексов типа примесь—собственный дефект, представляющих собой центры излучательной рекомбинации, вследствие их взаимодействия с упругими полями напряжений дислокаций.

Одной из важнейших характеристик механических свойств полупроводниковых кристаллов является предел текучести. Установлено, что текучесть кристаллов в основном определяется процессами взаимодействия легирующих примесей и собственных дефектов в поле напряжений дислокаций, возникающих как при выращивании кристаллов, так и при их пластической деформации [1–4].

Наибольший интерес как с научной, так и практической точек зрения вызывает изучение природы и механизма так называемого эффекта упрочняющего действия легирующих примесей в полупроводниках. Авторами [1] рассмотрены некоторые возможные механизмы влияния легирования на упрочнение кристаллов полупроводников  $A^{III}B^V$ . Кроме того, в [2, 3] предложена модель упрочнения  $n\text{-GaAs}$  при высокотемпературной ( $T \approx 0.6 T_{пл}$ ) деформации за счет комплексообразования — увеличения концентраций излучающих центров. Представляет интерес исследование влияния излучающих центров на прочность кристаллов GaAs в области более высоких температур ( $T \geq 0.6 T_{пл}$ ) деформации, т. е. в условиях существенного изменения свойств арсенида галлия [5].

В настоящей работе исследованы особенности изменения текучести сильно легированных кристаллов GaAs, обусловленные нетривиальным изменением концентрации излучающих центров при высокотемпературной пластической деформации.

### 1. Методика

Исследовались кристаллы легированного оловом с концентрацией электронов  $n \approx (5\text{—}9) \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$  арсенида галлия, выращенного в направлении  $\langle 111 \rangle$  по методу Чохральского. Плотность дислокаций в исходных кристаллах составляла  $N_d < 10^4\text{ см}^{-2}$ . Механические испытания проводили при температурах 800, 900, 1000 и 1100  $^\circ\text{C}$  одноосным растяжением вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  с постоянной скоростью деформации  $\dot{\epsilon} = 3.7 \cdot 10^{-5}\text{ с}^{-1}$  на установке типа ИМАШ-20-75 [2]. Для предотвращения разложения арсенида галлия на поверхности и испарения мышьяка испытания проводили под слоем флюса  $\text{B}_2\text{O}_3$ .

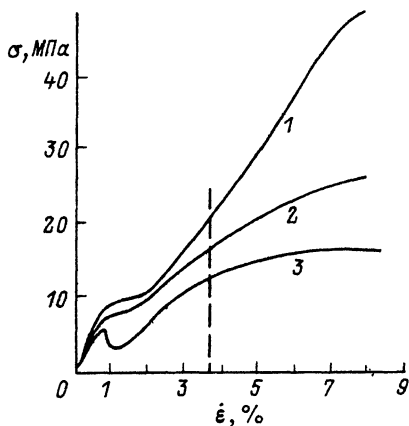


Рис. 1. Кривые напряжения—деформация сильно легированных кристаллов  $n$ -GaAs (Sn) при  $T$ , °С — 800 (1), 900 (2), 1100 (3).

Штриховой линией указана область измерения спектров фотолуминесценции.

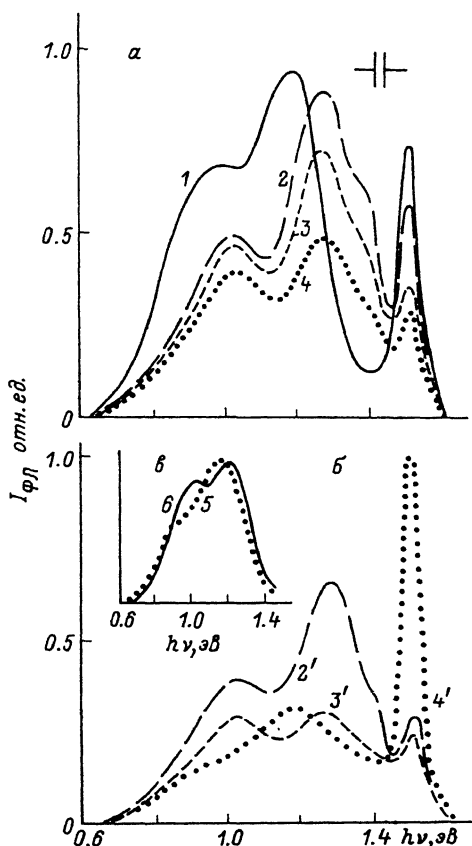


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции исходных (1), контрольных (2—4) и деформированных (2'—4') при различных температурах деформации, °С (2, 2' — 800; 3, 3' — 900; 4, 4' — 1100) кристаллов  $n$ -GaAs (Sn).

На вставке: длинноволновая область спектра излучения приповерхностного участка (5) и объема на глубине ~ 30 мкм (6) кристалла  $n$ -GaAs (Sn), деформированного при 1100 °С.

Спектры ФЛ при 77 К, возбуждаемые He—Ne-лазером, измеряли на исследуемых кристаллах до и после деформации, а также на контрольных кристаллах из тех же участков слитков, что и деформируемые кристаллы, и прошедших одновременно с ними аналогичную термообработку (ТО) (в той же камере). Концентрацию носителей заряда определяли из измерений эффекта Холла, а концентрацию излучающих центров — аналогично [5].

## 2. Результаты измерений

На рис. 1 приведены кривые напряжения — деформация кристаллов GaAs(Sn) при различных температурах. С ростом температуры деформации наблюдалось уменьшение предела текучести. Отличительной особенностью деформационных кривых является отсутствие зуба текучести при более низких температурах деформации и появление его при более высоких.

Спектры ФЛ исходных кристаллов были типичными для кристаллов GaAs с аналогичным уровнем легирования и содержали полосу краевого излучения с

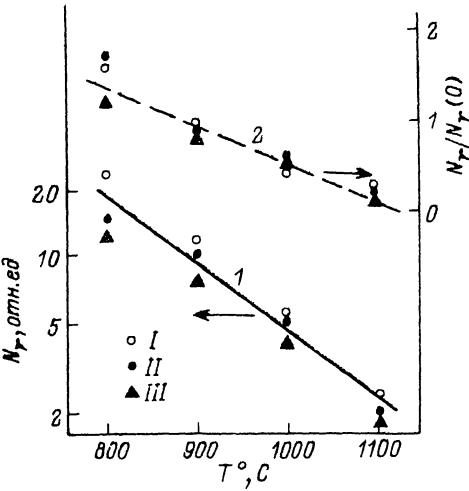


Рис. 3. Зависимости  $N_T$  (I) и  $N_T/N_T(0)$  (2) в деформированных и контрольных кристаллах  $n$ -GaAs (Sn) от температуры деформации.

I, II, III — для 1.02, 1.28, 1.40 эВ излучающих центров соответственно.

обусловленные комплексами  $\text{Cu}_{\text{Ga}}\text{V}_{\text{As}}$  и  $\text{Sn}_{\text{Ga}}\text{Cu}_{\text{Ga}}$  соответственно (рис. 2, а).

Кроме того, в спектрах ФЛ приповерхностной области кристаллов на коротковолновом спаде полосы с  $h\nu_m \approx 1.28$  эВ наблюдалась полоса излучения с  $h\nu_m \approx 1.40$ — $1.42$  эВ, возникающая обычно после ТО и обусловленная излучательными переходами электронов в комплексах, в состав которых входят вакансии мышьяка  $\text{V}_{\text{As}}$  [6]. С увеличением температуры ТО интенсивность всех наблюдаемых полос излучения существенно уменьшалась (рис. 2, а).

Высокотемпературная пластическая деформация при  $T = 800$ — $1000$  °C практически не изменяла спектральный состав излучения и приводила в основном к уменьшению эффективности ФЛ по сравнению с контрольными образцами (рис. 2, б).<sup>1</sup> Однако в кристаллах, деформированных при  $T = 1100$  °C, спектральный состав излучения изменялся и был практически аналогичен наблюдаемому в исходных кристаллах арсенида галлия. В то же время интенсивность краевого излучения была выше, а длинноволновых полос — ниже, чем в исходных кристаллах. Обращает на себя внимание, что восстановление люминесцентных свойств происходит с поверхности кристаллов, так как после стравливания слоя толщиной  $\sim 30$  мкм эффект исчезал (рис. 2, в).

Отметим, что изменение концентрации электронов в контрольных  $n_k$  и деформированных  $n_d$  кристаллах GaAs коррелировало с изменением эффективности ФЛ при увеличении температуры деформации. Так, величина  $n_k$  уменьшалась от  $9 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> при 800 °C до  $5.65 \cdot 10^{17}$  при 1100 °C, а  $n_d$  — от  $8.37 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> до  $5.89 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> соответственно, т. е. уменьшение  $n_d$  при относительно низких температурах деформации было более заметным в деформированных кристаллах, а при 1100 °C в этих же кристаллах наблюдалось его увеличение.

На рис. 3 приведены полученные из анализа спектров ФЛ (рис. 2) зависимости от температуры деформации концентрации центров излучательной рекомбинации  $N_T$  в деформированных кристаллах, а также их отношения к концентрации центров излучательной рекомбинации  $N_T/N_T(0)$  в контрольных кристаллах  $n$ -GaAs (Sn). Как видно, с увеличением температуры деформации концентрация центров излучательной рекомбинации в исследуемых кристаллах уменьшается практи-

<sup>1</sup> Уменьшение эффективности ФЛ может быть связано как с уменьшением концентрации центров излучательной  $N_T$ , так и с увеличением концентрации центров безызлучательной рекомбинации  $N_S$ . Совместный анализ изменений интенсивностей длинноволнового  $I_{\text{дв}} \sim (N_T/N_S)$  и краевого  $I_{\text{кр}} \sim (1/N_S)$  излучений в деформированных и контрольных кристаллах позволяет разделить вклад  $N_T$  и  $N_S$ -центров в изучаемые эффекты [5].

чески на порядок. В то же время зависимость  $N_r/N_r(0)$  имеет более сложный вид, а именно: в области температур  $T < 900^\circ\text{C}$  величина  $N_r$  в деформированных кристаллах превышает соответствующую величину  $N_r(0)$  в контрольных кристаллах, а в области температур  $T > 900^\circ\text{C}$  становится значительно меньше.

### 3. Обсуждение

Анализ экспериментальных результатов показывает, что развитие самой пластической деформации, как и ее влияние на спектры ФЛ кристаллов GaAs, существенно зависит от температуры деформации. При сравнительно низких температурах деформации характер деформационных кривых был монотонным, а при  $T = 1100^\circ\text{C}$  на кривой напряжение—деформация появлялся зуб текучести, т. е. наблюдалось резкое падение напряжения. Сравнение характера изменения деформационных кривых с соответствующими изменениями спектров ФЛ кристаллов GaAs свидетельствует о несомненной связи между ними и обусловленных, по-видимому, нетривиальным изменением концентрации излучающих центров при повышении температуры деформации (рис. 3). Действительно, как указывалось выше, изменение  $N_r$  существенно отличалось при различных температурах деформации. Сравнение поведения величины  $N_r$  с деформационными кривыми, приведенными на рис. 1, показывает, что во-первых, увеличение  $N_r$  при  $T = 800^\circ\text{C}$  сопровождается упрочнением кристаллов  $n$ -GaAs(Sn), обусловленным, как было установлено в [2], процессами комплексообразования, т. е. деформационно-индуцированным увеличением концентрации центров излучательной рекомбинации, представляющих собой комплексы типа примесь—собственный дефект [3, 5]. Во-вторых, резкое падение напряжения на деформационной кривой при более высоких температурах деформации сопровождается деформационно-индуцированным уменьшением величины  $N_r$ , обусловленным, по-видимому, распадом сложных излучающих центров в поле напряжения дислокаций на индивидуальные компоненты.

Указанное, очевидно, связано со следующим. Деформационно-индуцированное увеличение, а затем, при повышении температуры деформации, уменьшение концентрации центров излучательной рекомбинации может быть обусловлено различными механизмами взаимодействия комплексов, примесей и структурных дефектов в поле напряжения дислокаций при изменении концентрации дислокаций. Вообще говоря, такое взаимодействие может определяться двумя механизмами — электростатическим и упругим [4]. По-видимому, первый механизм взаимодействия является преобладающим в области относительно низких температур деформации при  $T < 900^\circ\text{C}$  и малой плотности дислокации.<sup>2</sup> Действительно, в сильно легированном  $n$ -GaAs(Sn) взаимодействие примесей и точечных дефектов в области повышенной их концентрации вокруг дислокаций (при их относительно низкой концентрации) значительно увеличивает концентрацию излучающих центров [5]. Второй механизм становится преобладающим в области высоких температур  $T > 900^\circ\text{C}$ , т. е. когда происходит существенное увеличение плотности дислокаций. Так как центры излучательной рекомбинации в исследуемых кристаллах  $n$ -GaAs(Sn) представляют собой сложные комплексы, то уменьшение концентрации последних происходит путем их диссоциации на составляющие в поле напряжений дислокаций. Особенно заметным этот процесс становится в области температур  $T = 1100^\circ\text{C}$ , т. е. при достаточно больших концентрациях дислокаций ( $\bar{N}_d \geq 10^7 \text{ см}^{-2}$ ), когда перекрываются поля их напряжений. Процесс распада комплексов в значительной степени облегчается следующим обстоятельством. Как известно, термическая стабильность комплексов в полупроводниках определяется энергией связи входящих в их состав компонент и подвижностью последних. Появление

<sup>2</sup> В исследуемых кристаллах плотность дислокаций при  $T = 900^\circ\text{C}$  не превышала  $10^6 \text{ см}^{-2}$  и уменьшалась при понижении температуры деформации.

вблизи комплексов повышенной концентрации примесей и структурных дефектов, стимулированных возникающими при деформации GaAs дислокациями, с одной стороны, ослабляет кулоновское взаимодействие между составляющими комплексов, т. е. уменьшает энергию связи последних, а с другой — способствует повышению подвижности их компонентов. Это приводит к понижению стабильности комплексов, их распаду, т. е. уменьшению концентрации излучающих центров, и, следовательно, к наблюдаемому экспериментально на деформационной кривой зубу текучести (рис. 1, 3). Заметим, что ряд дополнительных фактов подтверждает предложенную нами модель. Во-первых, уменьшение величины  $N_r$  по толщине деформированного кристалла связано с тем, что деформация в таких кристаллах, как было показано ранее [7, 8], начинается в приповерхностных слоях, а затем распространяется в объем (рис. 2, в), т. е. эффект уменьшения  $N_r$  обусловлен именно процессами деформации. Во-вторых, известно [5], что при малых величинах  $N_d$  центрами люминесценции ассоциируется дополнительный отрицательный заряд, обусловленный в основном вакансиями галлия  $V_{Ga}$ . Действительно, более значительное уменьшение  $I_{кр}$ , а также  $n_d$  в деформированных кристаллах при  $T < 900$  °C по сравнению с соответствующими величинами в контрольных кристаллах также свидетельствуют о дополнительной генерации  $V_{Ga}$  в процессе деформации.<sup>3</sup>

В-третьих, увеличение интенсивности  $I_{кр}$ , концентрации электронов  $n_d$ , а также восстановление исходных полос излучения с  $hw_m \approx 0.98$  и 1.18 эВ (при значительном уменьшении их интенсивности) в деформированных при  $T = 1100$  °C кристаллах GaAs свидетельствует о том, что в объеме кристаллов происходит процесс «очистения» от примесей и дефектов. Действительно, при достаточно больших плотностях дислокаций ( $1/N_d < r_d$ , где  $r_d$  — радиус сферы влияния дислокаций) они могут становиться эффективными стоками для индуцированных деформацией (в результате распада комплексов) примесей (например,  $Cu_{Ga}$ ) и дефектов (например,  $V_{Ga}$ ) [5].

Таким образом, анализ особенностей изменений люминесцентных свойств кристаллов сильно легированного *n*-GaAs(Sn), подвергнутых высокотемпературной деформации, позволяет заключить, что появление высокотемпературного зуба текучести в основном обусловлено распадом комплексов, представляющих собой центр излучательной рекомбинации.

#### Список литературы

- [1] Меженый М. В., Освенский В. Б., Мильвидская А. Г. // Кристаллография. 1990. Т. 35. № 5. С. 1182—1186.
- [2] Городниченко О. К., Глушков Е. А., Коваленко В. Ф. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 9. С. 2566—2569.
- [3] Городниченко О. К. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 3. С. 171—174.
- [4] Гольдфарб М. В., Молоцкий М. И. // ФТП. 1990. Т. 24. № 7. С. 1330—1333.
- [5] Глинчук К. Д., Лукат К., Прохорович А. В. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. Киев: Наукова думка, 1982. В. 1. С. 39—54.
- [6] Yin S. Y., Wittry D. V. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 1. P. 360—365.
- [7] Городниченко О. К. // Поверхность. 1989. № 4. С. 150—152.
- [8] Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. С. 280.

Институт полупроводников  
АН УССР  
Киев

Поступило в Редакцию  
3 сентября 1991 г.

<sup>3</sup> Уменьшение  $I_{кр}$  обычно связывается с возрастанием концентрации центров безызлучательной рекомбинации (например,  $V_{Ga}$ ), а  $n_d$  — с возрастанием в деформированных кристаллах концентрации в растворенной меди  $Cu_{Ga}$  на величину  $(n_x - n_d)$  [5].